

A proposal for compiling quantitative hydrogeological maps

CLAUDIA TARRAGONI(*), LUCIO MARTARELLI(**), SIMONA PIERDOMINICI(***),
MAURO ROMA(**) & CARLO F. BONI†(*)

ABSTRACT

An innovative approach to hydrogeological mapping based on quantitative analysis is shown in this paper. It gives some cartographical solutions for an immediate evaluation of the groundwater resources and their spatial distribution.

All relevant aquifers, springs and their regime, geological and structural setting and their hydraulic role should be shown in several understandable and clear hydrogeological maps where all hydrogeological information is reported in detail in the "Hydrogeological experimental Map" composed by a. "Hydrogeological Complexes and Natural Springs Map", b. "Surface Hydrology Map", c. "Conceptual Hydrogeological Model" and d. "Hydrogeological sections".

The cartographical solutions adopted for representing all these documents are proposed in this paper. Some graphical solutions have been proposed for improving the Italian official guidelines of hydrogeological mapping at scale 1:50.000, explain the legends symbols and illustrate the structure of a hydrogeological GIS database. An application of this approach has been carried out in north-western sector of Sibillini Mts. (Marche, Italy).

KEY WORD: *Quantitative hydrogeology, Hydrogeological cartography, Cartographical guidelines, Sibillini Mts. (Italy).*

RIASSUNTO

Proposte per la cartografia idrogeologica quantitativa.

In questo lavoro si illustrano i risultati di uno studio di idrogeologia quantitativa (BONI et alii, 2008) e si fornisce un contributo alla cartografia idrogeologica ufficiale alla scala 1:50.000, tramite la verifica di applicabilità delle norme previste dal Quaderno N°5 della collana Quaderni SGN, serie III, N°5 (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1995).

L'area di studio, situata nel settore nord-occidentale dei Monti Sibillini, è caratterizzata dall'affioramento dei termini pelagici della successione umbro-marchigiana in cui si alternano litotipi calcarei, calcareo-marnosi e silicei (per approfondimenti sull'assetto geologico - stratigrafico vedere e.g.: COLACICCHI et alii, 1970; CENTAMORE et alii, 1971, 1972, 1986; DAMIANI, 1975; LAVECCHIA, 1979, 1981; LAVECCHIA & PIALLI, 1981; BOCCALETTI et alii, 1983, 1986; CALAMITA & DEIANA, 1986, 1988; CALAMITA et alii, 1986, 1990, 1991, 1992; COOPER & BURBI, 1986; COSENTINO, 1986; BARCHI et alii, 1996), interessati da pieghe e sovrascorrimenti e da una successiva tettonica distensiva (LAVECCHIA, 1985; CALAMITA & PIZZI, 1994; LAVECCHIA et alii, 1994; BONCIO & LAVECCHIA, 2000). La paleogeografia dell'area, che condiziona l'assetto geologico

ed idrogeologico, è testimoniata dalla presenza di successioni ridotte o condensate (e.g. SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1941, 1967; CENTAMORE et alii, 1971; PIALLI, 1971; CHIOCCHINI et alii, 1976; DECANDIA, 1982; CENTAMORE et alii, 1986; CENTAMORE & MICARELLI, 1991; PARISI, 1994; PASSERI, 2001).

L'assetto idrogeologico è caratterizzato dalla presenza di un'alternanza di complessi idrogeologici a differente grado di permeabilità e di lineamenti strutturali che influenzano fortemente la circolazione idrica sotterranea. Le formazioni affioranti di prevalente composizione calcarea o calcareo-marnosa costituiscono importanti complessi idrogeologici con un alto grado di permeabilità relativa che deriva dal loro elevato grado di fratturazione; questi complessi sono sede preferenziale del processo di infiltrazione ed ospitano acquiferi con sorgenti aventi considerevoli portate. Le formazioni con un alto tenore di argilla o silice costituiscono complessi idrogeologici con basso grado di permeabilità, pertanto hanno un ruolo di acquiclude o aquitard a seconda che limitano completamente il flusso delle acque sotterranee o ne permettano un certo scambio tra acquiferi adiacenti (DRAMIS & DEIANA, 1972; BONI et alii, 1986; NANNI, 1991; MASTRORILLO, 1996; TARRAGONI, 2005; BONI et alii, 2008, 2009).

Lo studio si basa su aspetti quantitativi, evidenziando l'importanza del dato sperimentale acquisito con il rilevamento idrogeologico. Infatti, solo tramite la misura diretta delle risorse idriche è possibile ricostruire l'andamento delle portate nel tempo e nello spazio, procedere ad un calcolo di bilancio e ad una stima oggettiva dell'infiltrazione efficace media annua (eg: CELICO P., 1978; BONI & BONO, 1982; BONI et alii, 1986; CELICO & IANIRO, 2002). Altro aspetto fondamentale del rilevamento idrogeologico è l'identificazione dei limiti idrostrutturali che, avendo funzione di chiusura idraulica, delimitano gli acquiferi e ne permettono la misura dell'area di alimentazione (indispensabile ai fini di bilancio).

Mediante il monitoraggio mensile di 21 sezioni di misura in alveo, sono state riconosciute e misurate 13 sorgenti (3 puntuali, 9 lineari e 1 diffusa) e ne è stato ricostruito il regime di portata (TARRAGONI, 2005; BONI et alii, 2008). L'analisi geologico-strutturale ha permesso di individuare gli elementi che costituiscono delle barriere idrauliche ed i complessi idrogeologici che possono ospitare gli acquiferi. L'analisi integrata dell'assetto geologico-strutturale ed idrogeologico ha portato all'identificazione di cinque acquiferi. Per ciascuno di essi è stato eseguito il calcolo del bilancio idrogeologico mediante l'allestimento del Modello Idrogeologico Concettuale in cui i valori di Infiltrazione efficace media annua ottenuti sono stati raggruppati in classi omogenee.

I risultati dello studio idrogeologico sono stati restituiti sotto forma di cartografia tematica nel lavoro di BONI et alii (2008).

La Carta Idrogeologica sperimentale proposta è costituita da diversi livelli informativi che, per chiarezza di rappresentazione, sono stati restituiti graficamente come singoli prodotti:

La "Carta dei Complessi Idrogeologici e delle Emergenze naturali" è il documento principale in cui sono riportate le informazioni relative ai complessi idrogeologici (affioramenti, Infiltrazione efficace media annua ecc.) ed alle sorgenti puntuali, lineari e diffuse (ubicazione, portata media, portata minima ecc.). Gli altri documenti che la affiancano, come elementi complementari, sono:

- La "Carta dell'Idrologia di superficie", sintetizza i dati del rilevamento idrogeologico (reticolo idrografico perenne, ubicazione e tipologia delle sorgenti, opere di derivazione di varia natura, stazioni idrometriche, ubicazione delle sezioni di misura della portata e relativi dati, sintetizzati in apposite tabelle);
- Il "Modello Idrogeologico Concettuale" schematizza gli acquiferi riconosciuti (area di alimentazione, limiti dell'acquifero, punti di drenaggio, estensione del settore saturo, isopieze, coperture a

(*) Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Scienze della Terra, P.le Aldo Moro, 5, 00185 - Roma - claudia.tarragoni@uniroma1.it

(**) ISPRA - Dipartimento Difesa del Suolo/Servizio Geologico d'Italia, Via Curtatore, 3, 00185 - Roma

(***) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via di Vigna Murata, 605, 00143 - Roma.

bassa permeabilità) e vi associa il relativo bilancio idrogeologico;

- I "Profili idrogeologici" mostrano i rapporti tra i diversi acquiferi (rapporti stratigrafici tra complessi idrogeologici, distribuzione dei principali acquiferi riconosciuti, probabile estensione dell'acquifero, campo piezometrico medio, differenze di potenziale tra i vari acquiferi, limiti degli acquiferi, entità delle risorse idriche sotterranee rinnovabili e delle riserve permanenti).

Ciascuno di questi elaborati ha una propria legenda con simboli specifici che rappresentano schematicamente la realtà territoriale fornendo al lettore una chiara e semplice chiave di lettura (BONI *et alii*, 2008, 2009; ROMA & VITALE, 2008).

I dati sperimentali raccolti sono stati inseriti in ambiente GIS, allestendo un database idrogeologico dedicato, organizzato secondo livelli informativi con elementi a geometria poligonale, lineare e puntuale.

Prendendo come riferimento il modello preliminare di Geodatabase, elaborato da MARI *et alii* (2003, 2004), questo lavoro potrebbe, nella sua impostazione dei dati idrogeologici, aiutarne lo sviluppo di alcuni settori. Ad esempio, nella "Macro-suddivisione" dei Complessi idrogeologici, questi potrebbero vedersi integrata la definizione di ulteriori campi delle relative tabelle; o meglio definire alcuni valori, o range di valori, ammissibili all'interno del settore dei "Domini". L'impostazione idrogeologica di questo lavoro, basata su dati quantitativi oltre che qualitativi, potrebbe essere di supporto o di confronto nell'ambito degli studi intrapresi per l'informatizzazione idrogeologica, alla formulazione di un modello logico-concettuale e alla conseguente progettazione di una Banca Dati Idrogeologica che, nello stesso modo del Progetto CARG relativamente ai dati geologici, provveda ad organizzare le informazioni del territorio nazionale.

TERMINI CHIAVE: *Idrogeologia quantitativa, Cartografia idrogeologica, Linee guida cartografiche, Monti Sibillini (Italia).*

INTRODUCTION

This contribution provides new information on cartographical solutions for an immediate evaluation of the groundwater discharge and its spatial distribution by hydrogeological quantitative analysis and integrated hydrogeological mapping. This work founds on hydrological data and on the plates already published in two previous papers (BONI *et alii*, 2008; 2009); our challenge is to propose a method for compiling quantitative hydrogeological information by using several maps closely linked each other. In order to give to the reader a clear understanding of our paper, the plates from BONI *et alii*, 2008 have been repropounded.

Hydrogeological maps provide the starting point for a deeper understanding of the role that groundwater plays in the environment. As water is present almost everywhere in the subsurface of Italy, its behaviour depends on the specific geological and structural aspects. In the hydrogeological maps the aquifers are the main characters and their identification is critical for a right planning, management and using of water resource. The water will flow more easily in a reservoir rock with a high porosity due to interstices, fractures or type of rock. As consequence, the aquifer is more productive and more water can be extracted from water wells and will feed supplied rivers. Hydrogeological maps are built up by combining digital geological map data with information on groundwater-rock interaction for each specific type of rock. This information comes from a comprehensive inventory and database of punctual and linear springs and water wells, including data on water levels and flow rates. This information is an essential part of the digital hydrogeological map where important information about water quality, as well as information

on aquifer productivity, is revealed. Furthermore the digital maps yield interactive information about quantity and quality of groundwater at any location and can help to find locations where groundwater quantity and quality meet expectations. The maps directly show and give data about the extents, limits, thickness, and connectivity of geological bodies or layers which behave as aquifers or aquitards displayed in a plate. The maps convey some information about surface-groundwater interaction and recharge rates. This knowledge has been stored and translated into digital and informative layers (polygonal, linear and punctual geometry) which built up an interactive geographical database (ESRI Geodatabase).

This approach has been applied to a hydrogeological system composed by Chienti di Pievetorina, Fornace and up-stream Fiastrone basins (Marchean Apennines).

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL SETTING

The tectono-stratigraphic evolution is largely described in literature (e.g.: SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1941, 1967; COLACICCHI *et alii*, 1970; CENTAMORE *et alii*, 1971, 1972, 1986; DAMIANI, 1975; LAVECCHIA, 1979, 1981; LAVECCHIA & PIALLI, 1981; LAVECCHIA, 1985; BOCCALETTI *et alii*, 1983, 1986; CALAMITA & DEIANA, 1986, 1988; CALAMITA *et alii*, 1986, 1990, 1991, 1992; Cooper & Burbi, 1986; COSENTINO, 1986; CALAMITA & PIZZI, 1994; LAVECCHIA *et alii*, 1994; BARCHI *et alii*, 1996; BONCIO & LAVECCHIA, 2000) and an accurate synthesis is proposed in BONI *et alii* (2008, 2009).

From a geological point of view, the area is composed of a series of finely stratified sedimentary layers of pelagic environment, where the calcareous layers alternate with calcareous-marly and siliceous ones. In detail, the investigated area is characterized by the continuous Umbro-Marchean sequence from Calcare Massiccio (Lower Lias) to Camerino Sandstone (Lower Messinian), up to detrital, alluvial and travertine Quaternary deposits, while some discontinuous and condensed successions crop out in some zones of the study area.

The hydrogeological behaviour is strongly influenced by the geological and structural setting; this latter constrains the principal flow directions of all aquifers showing a N-S trend, parallel to the most important structural features, which represent some closed hydraulic boundaries.

As a consequence, the groundwater circulation and the location of the most important springs are conditioned by the geological-structural setting as:

I) the calcareous and calcareous-marly layers host aquifers and springs characterized by considerable discharges thanks to high permeability by fracturing (PERRONE, 1910; DRAMIS & DEIANA, 1972; BONI *et alii*, 1986; NANNI, 1991; MASTRORILLO, 1996; TARRAGONI, 2005; BONI *et alii*, 2008, 2009). Three complexes have been identified: 1) Undifferentiated basal calcareous Complex; 2) "Maiolica" Complex; 3) "Scaglia Calcareo" Complex (BONI *et alii*, 2008, 2009; see Plates 1 and 2).

II) the marly, siliceous and clayey sequence ("Rosso Ammonitico", "Calcari Diasprigni", "Marne a Fucoidi" and "Scaglia Cinerea") acts as an aquiclude or an aquitard, due to the lower or null permeability. Five complexes have been identified: 1) Calcareous-siliceous-marly Complex; 2) "Marne a Fucoidi" Complex; 3) "Scaglia Marnosa" Complex; 4) Marly and calcareous marly deposits Complex; 5)

| OBJECTID | Shape | AREA | PERIMETER | cod_comple | LIMITICL | LIMITICL_I | litologia | inf_eff | Shape_Length | Shape_Area |
|----------|---------|---------------|--------------|------------|----------|------------|-------------------------|-----------------|--------------|------------|
| 207 | Polygon | 110044,804852 | 2137,114258 | 1 | 218 | 0 | depositi alluvionali | <Null> | 2137,113001 | 110044,84 |
| 208 | Polygon | 1639589,83219 | 12826,108006 | 6 | 219 | 0 | scaglia calcarea | Non determinato | 3750,829943 | 173439,21 |
| 209 | Polygon | 1060384,23646 | 12342,768994 | 7a | 220 | 0 | fucoidi aquiclude | <Null> | 12342,769008 | 1060384,03 |
| 210 | Polygon | 154015,97831 | 1793,847531 | 6 | 221 | 0 | scaglia calcarea | 600 - 750 mm/a | 1793,846632 | 154015,85 |
| 211 | Polygon | 63228,259859 | 1260,103349 | 2 | 223 | 0 | depositi detritici | <Null> | 1259,557502 | 63225,00 |
| 212 | Polygon | 96127,859002 | 2326,796939 | 7b | 224 | 0 | fucoidi aquitard | <Null> | 2328,799168 | 96127,83 |
| 213 | Polygon | 65271,596609 | 982,767312 | 2 | 225 | 0 | depositi detritici | <Null> | 982,767072 | 65271,55 |
| 214 | Polygon | 879277,535423 | 4273,456266 | 5 | 226 | 0 | scaglia marnosa | <Null> | 4273,456410 | 879277,44 |
| 215 | Polygon | 1004211,22525 | 9078,554131 | 9b | 227 | 0 | silico-marnoso aquitard | <Null> | 9078,553386 | 1004211,01 |
| 216 | Polygon | 3317665,26077 | 32753,210147 | 7a | 228 | 0 | fucoidi aquiclude | <Null> | 32753,210803 | 3317665,25 |
| 217 | Polygon | 177941,718807 | 1816,559326 | 10 | 229 | 0 | calcarea basale | 600 - 750 mm/a | 1816,559552 | 177941,65 |
| 218 | Polygon | 1078909,07814 | 8292,604872 | 7a | 230 | 0 | fucoidi aquiclude | <Null> | 8292,607215 | 1078909,20 |
| 219 | Polygon | 6071994,50638 | 15897,725102 | 10 | 231 | 0 | calcarea basale | 450 - 600 mm/a | 15897,725380 | 6071994,23 |

Fig. 1 - Datashield showing hydrogeological complex data. It reports identification codes, lithological and effective infiltration information and related geometrical attributes. All these data derive from the Geodatabase specifically set up; an appropriate identification code is adopted to have unambiguous correspondence with the polygons referred to a specific complex type in the map.

– *Datashield dei complessi idrogeologici in cui figurano: codice identificativo del poligono e relativi attributi geometrici, litologia ed infiltrazione efficace. Tutti questi dati derivano da un Geodatabase appositamente allestito: un codice identificativo permette di avere una corrispondenza univoca con il poligono riferito ad uno specifico complesso idrogeologico nella carta.*

| OBJECTID | Shape | DXF_LAYER | port_min | port_med | LABEL |
|----------|-------|--------------------|---|--------------------|--------|
| 88 | Point | S_PUNTUALE_Q10 | | portata < 10 l/sec | <Null> |
| 89 | Point | S_PUNTUALE_Q10 | | portata < 10 l/sec | <Null> |
| 97 | Point | S_PUNT200L_SCAGLIA | Portata minima compresa tra il 50 e 62,5% della portata media (5/8) | 201-300 l/sec | Fo461 |
| 98 | Point | S_PUNT200L_SCAGLIA | Portata minima compresa tra il 62,5 e 75% della portata media (6/8) | > 300 l/s | Fo453 |
| 214 | Point | S_PUNTMAIOLICA | Portata minima compresa tra il 25 e 37,5% della portata media (3/8) | 101-200 l/sec | Ch518 |
| 215 | Point | S_PUNTMAIOLICA | | Sorgente captata | <Null> |
| 216 | Point | S_PUNTMAIOLICA | | Sorgente captata | <Null> |
| 223 | Point | S_PUNTSC_CAPTATA | | Sorgente captata | <Null> |
| 225 | Point | S_PUNTSC_CAPTATA | | Sorgente captata | <Null> |

Fig. 2 - Datashield showing punctual spring data. It reports identification codes, punctual spring discharge information and the specification of the feeding aquifer. All these data derive from the Geodatabase specifically set up; an appropriate identification code is adopted to have unambiguous correspondence to a definite element in the map.

– *Datashield delle sorgenti puntali in cui figurano: codice identificativo, informazioni relative alla portata e all'acquifero di appartenenza della sorgente puntuale. Tutti questi dati derivano da un Geodatabase appositamente allestito: un codice identificativo permette di avere una corrispondenza univoca con uno specifico elemento nella carta.*

| OBJECTID | Shape | DXF_LAYER | var_port | rotation | port_min | LABEL |
|----------|-------|-------------------|-----------|----------|-------------------------------------|-----------|
| 70 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 10 - 50 | 320 | <Null> | <Null> |
| 71 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 10 - 50 | 350 | <Null> | <Null> |
| 72 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 10 - 50 | 60 | <Null> | <Null> |
| 73 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 201 - 300 | 50 | Portata minima 0 - 20% della media | Ch565-643 |
| 74 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 101 - 200 | 340 | Portata minima 41 - 60% della media | Ch488-527 |
| 79 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 10 - 50 | 0 | <Null> | <Null> |
| 80 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 10 - 50 | 350 | <Null> | <Null> |
| 81 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 10 - 50 | 45 | <Null> | <Null> |
| 82 | Point | S_LINEARE_SCAGLIA | 101 - 200 | 45 | Portata minima 41 - 60% della media | Fo440-461 |
| 103 | Point | S LINEARE SCAGLIA | 10 - 50 | 270 | <Null> | <Null> |

Fig. 3 - Datashield showing linear spring data. It reports identification codes, linear spring discharge information and the specification of the feeding aquifer. All these data derive from the Geodatabase specifically set up; an appropriate identification code is adopted to have unambiguous correspondence to a definite element in the map.

– *Datashield delle sorgenti lineari in cui figurano: codice identificativo, informazioni relative alla portata e all'acquifero di appartenenza della sorgente lineare. Tutti questi dati derivano da un Geodatabase appositamente allestito: un codice identificativo permette di avere una corrispondenza univoca con uno specifico elemento nella carta.*

Marly-arenaceous- terrigenous deposits Complex (BONI *et alii*, 2008; see Plates 1 and 2).

Some independent overlapping aquifers with different potentialities and springs, and process of exchange for

drainance among overlapping aquifers through complexes having an aquitard role, have been recently identified (TARRAGONI, 2001, 2005; BONI *et alii*, 2008, 2009).

The hydrogeological complexes, the hydraulic bound-

HYDROGEOLOGICAL COMPLEXES

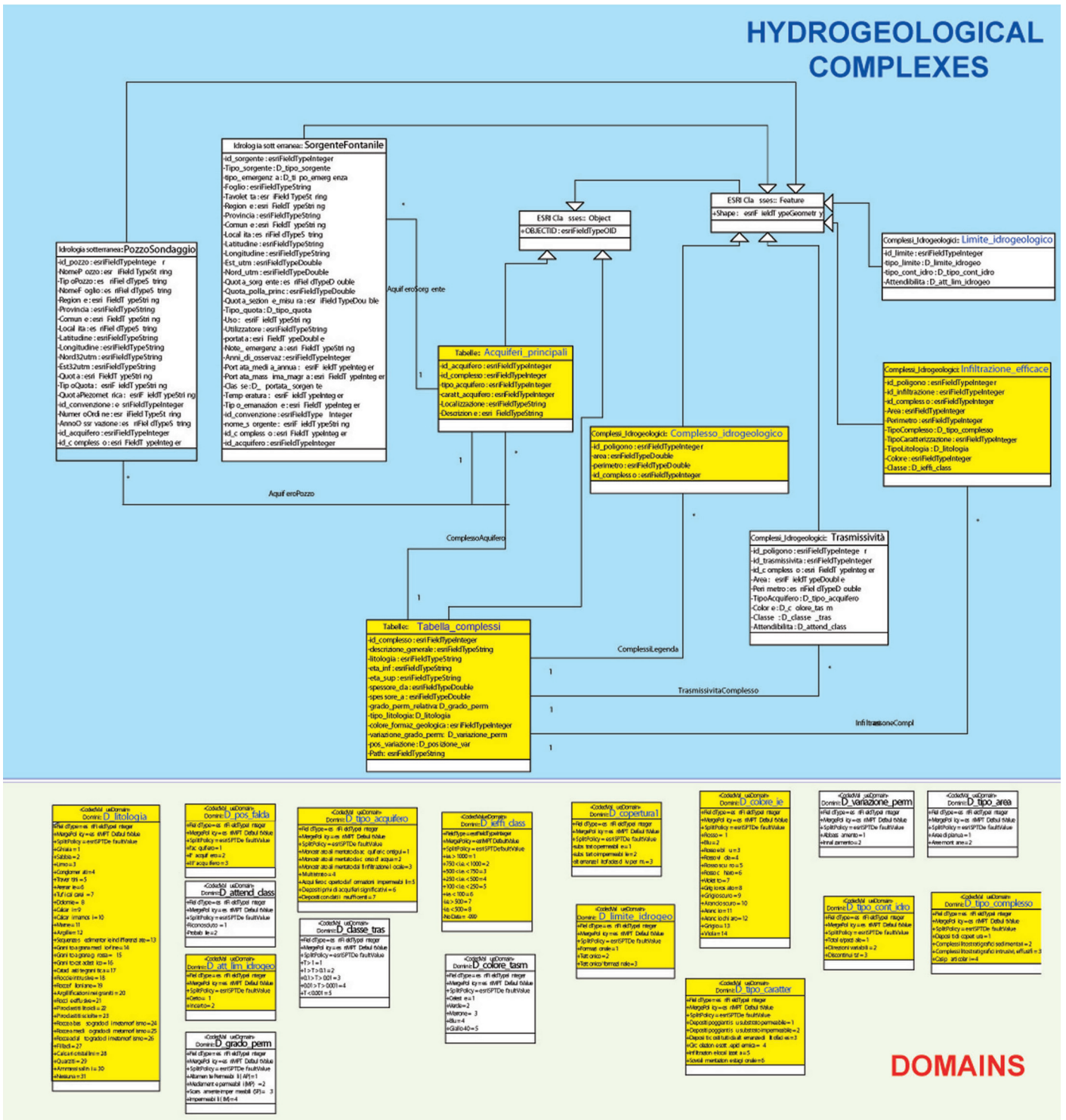


Fig. 4 - Abstract from the preliminary informative conceptual model (modified from MARI *et alii*, 2004). The yellow-evidenced parts have been specifically issued in this work to support the improvement of a quantitative hydrogeological Geodatabase.
 – Diagramma di flusso preliminare del modello informativo concettuale (modificato da MARI *et alii*, 2004). I riquadri evidenziati in giallo sono stati specificatamente introdotti nel diagramma al fine di migliorare il Geodatabase idrogeologico quantitativo.

aries (tectonic and/or stratigraphic), the saturated portions of aquifer, the main sources, the mean piezometric field, the perennial hydrographic network and the anthropic homemade build up the Conceptual Hydrogeological Model (CHM; Plate 3) characterized by aquifers with their

own hydrogeological budget (BONI *et alii*, 2008).
 stazioni idrometriche, ubicazione delle sezioni di misura della portata e relativi dati, sintetizzati in apposite tabelle);
 - Il “Modello Idrogeologico Concettuale” schematiz-

za gli acquiferi riconosciuti (area di alimentazione, limiti dell'acquifero, punti di drenaggio, estensione del settore saturo, isopieze, coperture a bassa permeabilità) e vi associa il relativo bilancio idrogeologico;

- I "Profili idrogeologici" mostrano i rapporti tra i diversi acquiferi (rapporti stratigrafici tra complessi idrogeologici, distribuzione dei principali acquiferi riconosciuti, probabile estensione dell'acquifero, campo piezometrico medio, differenze di potenziale tra i vari acquiferi, limiti degli acquiferi, entità delle risorse idriche sotterranee rinnovabili e delle riserve permanenti).

Ciascuno di questi elaborati ha una propria legenda con simboli specifici che rappresentano schematicamente la realtà territoriale fornendo al lettore una chiara e semplice chiave di lettura (BONI *et alii*, 2008, 2009; ROMA & VITALE, 2008).

I dati sperimentali raccolti sono stati inseriti in ambiente GIS, allestendo un database idrogeologico dedicato, organizzato secondo livelli informativi con elementi a geometria poligonale, lineare e puntuale.

Prendendo come riferimento il modello preliminare di Geodatabase, elaborato da MARI *et alii* (2003, 2004), questo lavoro potrebbe, nella sua impostazione dei dati idrogeologici, aiutarne lo sviluppo di alcuni settori. Ad esempio, nella "Macro-suddivisione" dei Complessi idrogeologici, questi potrebbero vedersi integrata la definizione di ulteriori campi delle relative tabelle; o meglio definire alcuni valori, o range di valori, ammissibili all'interno del settore dei "Domini". L'impostazione idrogeologica di questo lavoro, basata su dati quantitativi oltre che qualitativi, potrebbe essere di supporto o di confronto nell'ambito degli studi intrapresi per l'informatizzazione idrogeologica, alla formulazione di un modello logico-concettuale e alla conseguente progettazione di una Banca Dati Idrogeologica che, nello stesso modo del Progetto CARG relativamente ai dati geologici, provveda ad organizzare le informazioni del territorio nazionale.

QUANTITATIVE HYDROGEOLOGICAL MAPPING

The deep quantitative hydrogeological knowledge accomplished in the Sibillini Mts. has allowed the selection of this area for a specific test study on quantitative hydrogeological mapping aspects, with the purpose of evidencing, by innovative informative criteria concerning GIS cartographical representation at the 1:50.000 scale, the groundwater resources on the basis of the effective infiltration of the hydrogeological complexes.

The map legend has been proposed as a comprehensive synthesis of all the hydrogeological elements characterizing the study area. In particular, specific criteria for the definition and representation of these elements have been proposed in order to account for the following questions (from which the acronym WHWW is derived): "Where" they occur (e.g., localization of all springs of different type); "How much" resource is involved (e.g., flow discharge immediately visible from the symbol dimension); "What kind" of discharge regime is deducible (e.g., spring discharge registered at least by monthly measurements); "Which" aquifer system they belong to (e.g., different colour for different aquifer affiliation).

HYDROGEOLOGICAL DATA MANAGEMENT

The hydrogeological field data have been first elaborated to constitute an informative database. Then the storage and organization processes of these data have also been conducted, to allow a prompt consultation and the carrying on of cartographical elaborations by GIS software. A geographical database (ESRI Geodatabase) has been also realized, and informative layers with element having polygonal, linear and punctual geometry have been produced. Figures 1, 2 and 3 show some of these informative layers, realized in datasheet format, in which the information about the hydrogeological complexes and the linear and punctual springs are collected.

The hydrogeological complexes having significant permeability degree have been classified according to their mean effective infiltration values, while the springs have been classified according to three parameters: the feeding aquifer, the annual mean discharge and the minimal discharge.

The attribute domains (i.e. the acceptable range of values in the Geodatabase) for the hydrogeological complexes defined in term of effective infiltration and for the springs are shown in table 1. These values likely represent the main elements of an informative conceptual model finalized to the improvement of a relational geodatabase. This latter is then required to make available the hydrogeological data in GIS environment and, in a next extent, to allow their integration with other existing database, in particular that realized for the Italian CARG Project.

The preliminary informative conceptual model elaborated by MARI *et alii* (2003, 2004), which takes into account the hydrogeological data organization, may support the definition of some segments of the geodatabase. In this respect, the "macro-category" of the hydrogeological complexes may be implemented with additional fields and related attribute tables, and some acceptable values or range of values within the "domains" sectors may be further detailed (fig. 1). As a whole, since this paper mainly deals with quantitative (as well as qualitative) field hydrogeological information and the collected data on hydrogeological complexes and springs are finalized to hydrogeological budget calculations, this work may represent a contribution to the definition of general criteria for the informatization of hydrogeological data, for the realization of hydrogeological conceptual models and for the definition of an informative hydrogeological database, which may constitute, in a next future, the hydrogeological segment of the CARG project database at a national scale.

PROPOSALS FOR COMPILING QUANTITATIVE HYDROGEOLOGICAL MAPS

Aimed to a valuable representation of the previously defined hydrogeological information obtained by quantitative hydrogeology criteria, this work has taken into account as much as possible the Italian hydrogeological cartography guidelines (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1995) but offers cartographical proposals for an immediate understanding of the groundwater resources features. Different cartographical documents are required to show the several specific hydrogeological information of a given district with an appropriately detailed characterization. Anyway,

TABLE 1

Organization and classification of the Geodatabase attribute domains (acceptable range of values) for hydrogeological complexes (effective infiltration), punctual springs (mean and minimum discharge) and linear springs (mean and minimum stream flow increase).

– *Organizzazione e classificazione degli attributi dei domini del Geodatabase (intervallo dei valori) per i complessi idrogeologici (Infiltrazione efficace) e per le sorgenti puntuali e lineari (portata media e minima).*

| | | DOMAIN NAME | DOMAIN VALUES | DESCRIPTION |
|-----------------|---------------------------|---------------|--|---|
| HYDROGEOLOGICAL | Effective Infiltration | I_eff | < 450 450 - 600 600 - 750 > 750 undefined | Mean Effective Infiltration value (mm/a). |
| SPRINGS | Punctual spring discharge | Discharge med | Tapped < 10 101-200 201-300 > 300 | Mean discharge value (l/sec). |
| | | Discharge min | 0 - 12,5 12,5 - 25 25 - 37,5 37,5 - 50 50 - 62,5 62,5 - 75 75 - 87,5 87,5 - 100 | Minimal discharge value expressed as a percentage of the mean discharge value. Each range of percentage classes corresponds to 1/ 8 of the whole (100%), to allow the best graphical representation of the minimal discharge (fig. 3). |
| | Linear spring discharge | INCREASE med* | 10 – 50 51 – 100 101 – 200 201 – 300 > 300 | Increase* of stream flow along the water course bed related to the mean groundwater contribution expressed in l/s. *The term “Increase” represents the stream flow variation along the water course bed. |
| | | INCREASE min* | 0 – 20 21 – 40 41 – 60 61 – 80 81 - 100 | Increase* of stream flow along the water course bed related to the minimal groundwater contribution expressed in percentage of the mean contribution. These range of percentage classes are used to allow the best graphical representation of the minimal discharge (fig. 4). *The term “Increase” represents the stream flow variation along the water course bed. |

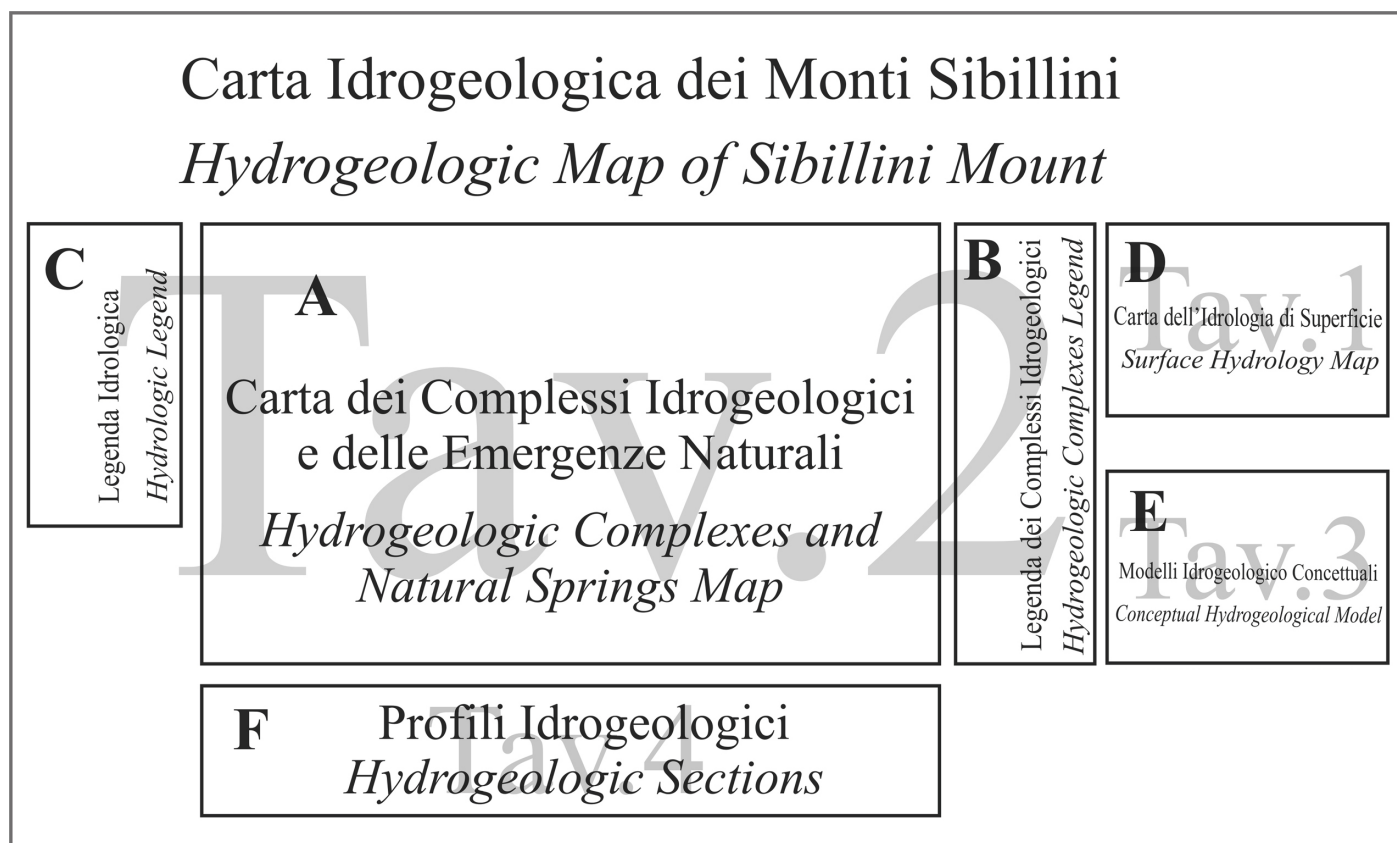


Fig. 5 - Overview of part of the experimental Hydrogeological Cartography. The Map consists in the outline of different informative layers. The main cartographic document is the Hydrogeological complexes and Natural Springs Map (A) with its legends (B and C), while complementary elements are the Surface Hydrology Map (D), the Conceptual Hydrogeological Model of the distinguished aquifers (E); some Hydrogeological Sections (F).

– Schema-tipo della Carta Idrogeologica sperimentale. La carta è composta da differenti documenti. Il principale documento cartografico è la Carta dei Complessi idrogeologici e delle emergenze naturali (A) con le relative legende (B e C), mentre gli elementi complementari sono la Carta dell'Idrologia di superficie (D), il Modello Idrogeologico Concettuale dei diversi acquiferi riconosciuti (E) ed alcuni Profili idrogeologici (F).

the whole picture of the situation must be displayed for a correct and easy evaluation of the territory by the exposed information. Then, the experimental hydrogeological cartography of this study was thought like a harmonized realization of different informative layers, from which the Hydrogeological complexes and Natural Springs Map was assumed as main map; the Surface Hydrology Map, the Conceptual Hydrogeological Model of the distinguished aquifers and some Hydrogeological Sections were chosen as complementary smaller scale maps at the margin of the previous one (fig. 5). Detailed aspects of the hydrogeological cartography are given in BONI *et alii* (2008), while in this paper some specific mapping solutions will be shown.

The Hydrogeological complexes and Natural Springs Map will be commented after the other maps, since it represents the document in which the main hydrogeological information and groundwater budget elements were collected.

SURFACE HYDROLOGY MAP

The hydrogeological quantitative data measured during field survey have been sketched in the Surface Hydrology

Map, in which the perennial hydrographic network, the water works (municipal/hydroelectrical derivations and restitutions), water well fields, dams, hydrometrical stations, measurement stations and springs (punctual, linear and diffused) have to be clearly and well represented. Labels with the main information (name, acronym, survey time interval, number of measurements, calculated mean Q and measured minimum Q) about stream and spring measurement stations have also been displayed (Plate 1).

CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL

The Conceptual Hydrogeological Model Map (Plate 3) of the distinguished aquifers has been adopted to describe the recharge areas, the saturated zone, the presence of a low permeability cover, the probable average piezometric field. The springs, differentiated on the basis of their feeding aquifer and of the total mean discharge, the latter used for MEI calculation (mean discharge by recharge area size), have also been reported. Finally, a summary table of the measured and/or calculated values of the hydrogeological budget elements (mean discharge totally supplied by the aquifer, recharge area size, mean calculated values

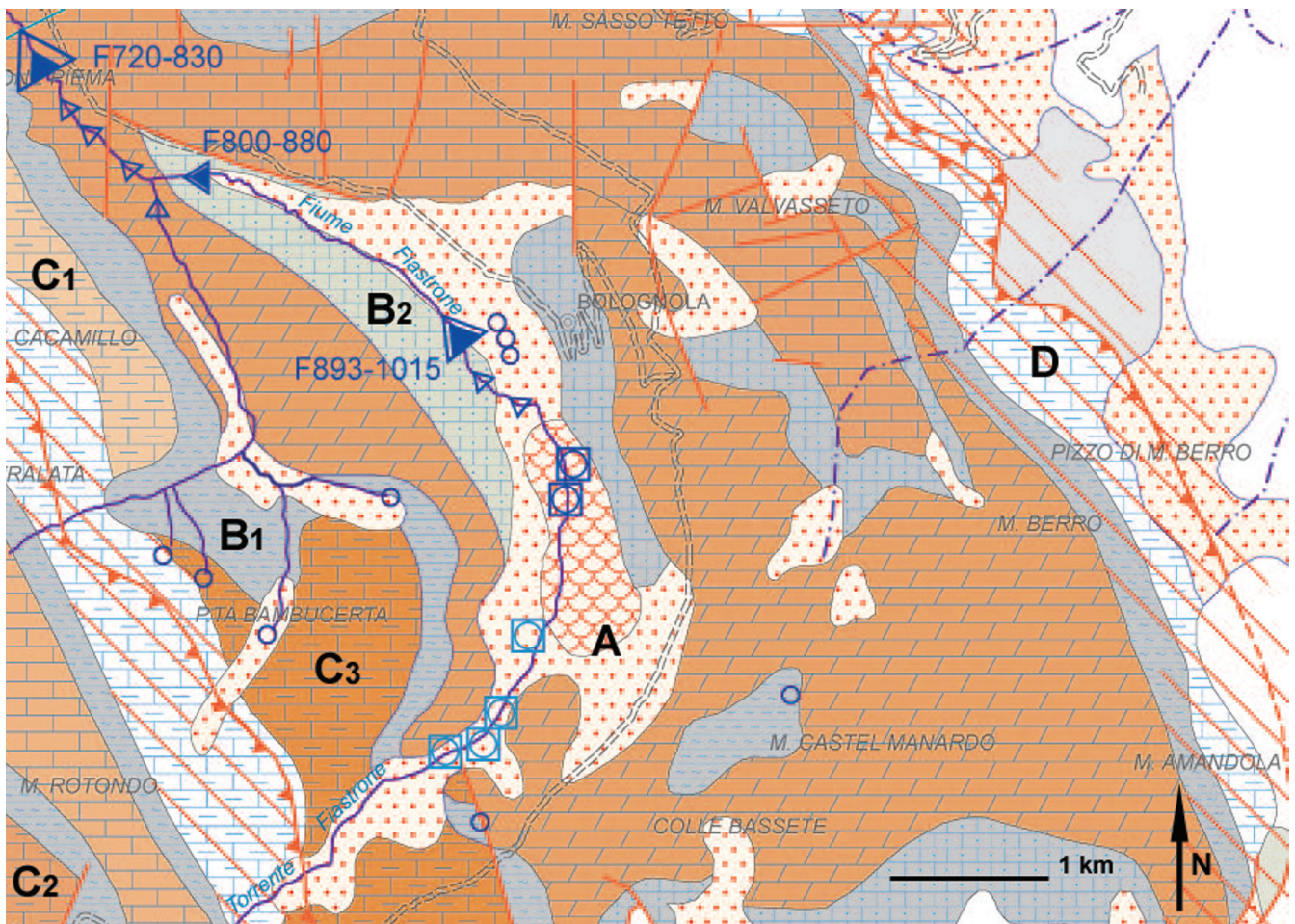


Fig. 6 - Detail of the Hydrogeological Complexes and Natural Springs Map. It shows the following specific situations: (A) permeable complexes having a subordinate role in the regional hydrogeological framework (e.g. recent sedimentary cover), represented with a red pattern indicating the infiltration process and a light background; (B1, B2) complexes not involved in the infiltration process, which support or delimit the defined aquifers, symbolized by a full grey colour nuances a greenish-grey when drainance process occur; (C1, C2, C3) carbonatic complexes, representing the favoured sectors for the infiltration process, indicated by an overlapping double symbology constituted by a pattern indicating the complex type and a background colour in different red nuances representing the MEI levels (the same complex may have different red colour nuances); (D) complexes defining the hydrogeological setting of the area but are partly outside the working sector and it was not possible to define a conceptual hydrogeological model and then are not evidenced with a background colour but only with a pattern indicating the complex type (from BONI *et alii*, 2008, 2009).

– *Dettaglio della Carta dei Complessi Idrogeologici e delle Emergenze naturali in cui si possono riconoscere: (A) complessi permeabili aventi un ruolo subordinato nell'assetto idrogeologico regionale (ad esempio le coperture recenti), detti complessi sono rappresentati da un pattern rosso indicante il processo di infiltrazione e da uno sfondo chiaro; (B1, B2) complessi che non sono sede del processo d'infiltrazione e sostengono o limitano gli acquiferi riconosciuti, rappresentati con un colore pieno dei toni del grigio o del grigio-verde se sussiste drainance; (C1, C2, C3) complessi carbonatici, sede preferenziale del processo d'infiltrazione, rappresentati con una duplice simbologia costituita da un pattern indicativo del complesso e da un colore nei toni del rosso che ne mostri l'entità dell'Ieff (uno stesso complesso può assumere un diverso tono di rosso); (D) complessi che definiscono l'assetto idrogeologico dell'area, ma dal momento che vanno oltre i limiti del lavoro svolto non è stato possibile allestirne un modello idrogeologico e pertanto non hanno un colore rappresentativo ma solo un retino relativo al complesso (da BONI *et alii*, 2008, 2009).*

of MEI) has been added (Plate 1).

Aimed to a valuable cartographical result, the cover is represented with a grey colour, the recharge area with a red colour and the saturation zone with two different blue colour gradations: light, if the aquifer is uncovered, dark, if a cover is present.

HYDROGEOLOGICAL COMPLEXES AND NATURAL SPRINGS MAP

The specific and innovative proposals for the legend of the Hydrogeological complexes and Natural Springs Map

are of main importance (Plate 2). They, in fact, represent an significant implementation for the present guidelines to the Italian hydrogeological cartography (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1995) and, thus, some examples taken from this map will be here shown.

Regarding the symbol legend of the Hydrogeological complexes and Natural Springs Map, the spring symbol (figure 1) has a peculiar structure that allows the immediate understanding of the mean discharge values (outer symbol size), of the seasonal yield variations (lowest measured discharge value represented by the size of a full symbol inside the previous one) and of the aquifer supplying

the spring (different gradient of blue). Furthermore, the linear springs have been displayed by a specific symbol, not included in the current guideline legend list, clearly indicating the length of the groundwater draining sector.

Concerning the diffused springs, they have been displayed using a polygonal symbol that traces out the area hosting the springs. This kind of representation applies to those cases where it is not possible to identify the individual spring because the water gushes out through several little undistinguishable springs: an example of diffused springs is provided by Gole dell'Acquasanta, where a number of springs occur along a wide front (1 Km-long and 100 m-high) covered by travertine (TARRAGONI, 2005; BONI *et alii*, 2008, 2009).

Finally, a pattern, indicating the areas in which intense tectonic lamination processes have acted, has also been proposed, as the tectonic processes may induce important variations of the hydrogeological features with respect to those of the original lithotypes.

In contrast with the official guidelines (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1995), in which the hydrogeological complex is distinguished on the basis of the lithological features, reflecting their subjectively supposed relative permeability degree (high, medium, low, impermeable), it is here proposed that the legend must rely on quantitative aspects, like, for instance, the MEI. The proposal of this paper is, therefore, the distinction of the hydrogeological complexes in relation to their hydrogeological role, defined after detailed field surveys (characterization of the surface hydrology by means of systematic measurements of punctual and linear springs and base flow discharge), and the illustration of quantitative aspects by means of a suitable mapping of the hydrogeological complexes.

The following hydrogeological situations have then been represented with specific symbols:

- complexes having a secondary role in the regional hydrogeological scenario (e.g., recent sedimentary covers), displayed with a red pattern indicating the complex type and a clear and light background, for evidencing their scarce importance in the hydrogeological processes;
- complexes not involved in the infiltration process but supporting and delimiting the aquifers, represented with a full colour in grey gradations (or grey-greenish if drainage processes occur through them), to make them clearly visible;
- carbonatic complexes, which are mainly interested in the infiltration process, indicated with two overlapped symbols: i) a pattern indicating the complex type, ii) colours in red gradation showing the MEI class of values, these latter calculated by the field measurement of the hydrogeological budget elements, collected for each distinguished aquifer; of course, a same complex type may assume a different colour in relation to its MEI values, the latter depending on both the induced tectonic alteration and the local rainfall amount;
- sectors defining the hydrogeological asset of the study area, but spreading beyond the field work zone, and then the assessing of a conceptual hydrogeological model was not feasible, for lacking of data on all the occurring springs; they are not displayed with a background colour, but only with a pattern indicating the complex type, to evidence that the hydrogeological study has not allowed a quantitative characterization (fig. 6).

The choice of such chromatic scale has also an imme-

diante evidence for areas most potentially exposed to vulnerability, as the effective infiltration is also significant in the algorithms for the intrinsic vulnerability parametrical calculation, evidencing in an intense red colour the recharge areas, actually prone to this kind of risk.

Furthermore, the definition of specific effective infiltration value intervals for the classification of the various hydrogeological complexes has allowed a clear assessment of their different behaviour and participation in the groundwater hydrodynamic scenario.

HYDROGEOLOGICAL CROSS-SECTIONS

The elaboration of hydrogeological cross-sections (BONI *et alii*, 2008; see Plate 4), aimed to a spatial reconstruction of the aquifer assets, is suitable to show: i) the stratigraphical relationships among the hydrogeological complexes; ii) the spatial distribution and extent of the aquifers; iii) the probable piezometric field of the distinguished aquifers; iv) the presence of groundwater divides; v) the groundwater renewable resources and permanent reserve.

In agreement to all these purposes, some specific mapping proposals will follow. In particular, the saturated zone of each distinguished aquifer is clearly evidenced with a different gradation of blue full colour, following what has already been described for the conceptual hydrogeological models, while the geological features and the hydrogeological complexes have been represented only with a specific pattern of the colour used in the map to indicate the complex type. These symbols may help to characterise, as well as the piezometric surface, also the probable amount of the permanent groundwater reserve of each aquifer.

CONCLUSIONS

This work underlines the importance of a clear cartographical representation of experimental data, quantification of groundwater by integration and combining of several hydrogeological mapping methods.

To get the purpose to make up an objective cartography, it is very important to make use of a well-done hydrogeological survey for the identification and quantification of groundwater resources and for the identification of the hydrogeological boundaries.

Each spring has been represented with a specific symbol (circle, triangle or polygon) having dimension proportional to the mean discharge value, and an inner part (full colour) indicating the lowest measured discharge value; therefore the different colours refer to the different origin of the aquifer. In this way, the map shows immediately the position, discharge regime and origin of each spring.

For every aquifer a CHM has been acquired and the budget has been calculated obtaining the MEI value; this latter is the objective quantitative data representing the main behaviour of each complex. The map shows each aquifer with corresponding colour of MEI. The different values of MEI are represented in red gradations. The choice of red gradation has been made for its high visual impact: the aquifer is an area hosting the infiltration process and then having predisposition to groundwater

contamination. The complexes having role of aquitard or aquiclude are represented in green and grey-greenish gradation, respectively.

The hydrogeological field data have been first elaborated to constitute an informative database. A geographical database (ESRI Geodatabase) has been also realized and informative layers with element having polygonal, linear and punctual geometry have been produced. The classification of the hydrogeological complexes, according to their mean effective infiltration values, and of the springs, according to three parameters (the feeding aquifer, the annual mean discharge and the minimal discharge), have been chosen as the main elements of an informative conceptual model finalized to the improvement of a relational Geodatabase. This latter kind of database is needed to make available the hydrogeological data in GIS environment and, in a next extent, to allow their integration with other existing database, in particular that realized for the Italian CARG Project. The attribute domains (i.e. the acceptable range of values in the Geodatabase) for the hydrogeological complexes and for the springs have also been defined.

As a whole, since this paper mainly deals with quantitative (as well as qualitative) field hydrogeological information and the collected data on hydrogeological complexes and springs are finalized to hydrogeological budget calculations, this work may represent a contribution to the definition of general criteria for the informatization of hydrogeological data, to the realization of hydrogeological conceptual models and of an informative hydrogeological database, which may constitute in a next future the hydrogeological segment of the CARG project database at a national scale. The cartographical proposals of this work are aimed to an immediate understanding of the groundwater resource features.

Therefore, the Experimental Hydrogeological Mapping has been prepared as the overlap of different informative levels: Hydrogeological Complexes and Natural Springs Map (main document), Surface Hydrology Map, Conceptual Hydrogeological Models Maps (complementary elements) and the Hydrogeological sections.

ACKNOWLEDGMENTS

The Authors wish to thank the two anonymous reviewers for their helpful comments and remarks which led to significant improvements of the original manuscript.

REFERENCES

- BARCHI M., MINELLI G. & PIALI G. (1996) - *Tettonica dell'Appennino settentrionale alla luce dei risultati del CROP 03*. Abstract Convegno: "Presentazione dei risultati del profilo sismico CROP 03". Roma, novembre 1996, 11-12.
- BOCCALETTI M., CALAMITA F., CENTAMORE E., DEIANA G. & DRAMIS F. (1983) - *The Umbria-Marche Apennine: an example of thrusts and wrenching tectonics in a model of ensialic Neogenic-Quaternary deformation*. Boll. Soc. Geol. It., **102**, 581-592.
- BOCCALETTI M., CALAMITA F., CENTAMORE E., CHIOCCHINI U., DEIANA G., MICARELLI A., MORETTI G. & POTETTI M. (1986) - *Evoluzione dell'Appennino tosco-umbro-marchigiano durante il Neogene*. Giornale di geologia, **48**, 227-233.
- BONCIO P. & LA VECCHIA G. (2000) - *A structural model for active extension in Central Italy*. J. of Geodynamics, **29**, 233-244.
- BONI C. F. & BONO P. (1982) - *Prima valutazione quantitativa dell'infiltrazione efficace sui sistemi carsici della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese e nei sistemi di facies pelagica umbro-marchigiana-sabina (Italia centrale)*. Geologia Applicata e Idrogeologia, **17**, 427-436.
- BONI C.F., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 991-1012.
- BONI C.F., TARRAGONI C. & MARTARELLI L. (2008) - *Cartografia idrogeologica sperimentale nel settore nord-occidentale dei Monti Sibillini (Marche)*. In: L. Martarelli, A.R. Scalise (eds.) "Studi sperimentali finalizzati alla cartografia idrogeologica". Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. **LXXXI**, 89-114.
- BONI C.F., TARRAGONI C., MARTARELLI L. & PIERDOMINICI S. (2009) - *Hydrogeological study of the Monti Sibillini north-western sector: A contribution to the official hydrogeologic mapping*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1**, 25-40.
- CALAMITA F., CENTAMORE E., DEIANA G. & MICARELLI A. (1986) - *Evoluzione tettonico-sedimentaria dell'area umbro-marchigiana dal Trias al Pleistocene*. In "La Geologia delle Marche", Studi Geol. Camerti, numero speciale in occasione del 73° Congresso della Società Geologica Italiana, Roma, 30 settembre-4 ottobre 1986, 89-90.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1986a) - *Geodinamica dell'Appennino Umbro-Marchigiano*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 311-316.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1986b) - *Evoluzione strutturale neogenico-quadernaria dell'Appennino umbro-marchigiano*. Studi Geol. Camerti, Vol. speciale "La Geologia delle Marche", 91-98.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1988) - *The arcuate shape of the Umbria-Marche Apennines (Central Italy)*. Tectonophysics, **146**, 139-147.
- CALAMITA F., PIZZI A. & TOSTI A. (1990) - *Blind-thrust: esempi nell'appennino Umbro-Marchigiano*. E carta allegata "Le associazioni strutturali di Monte Patino e di Monte Fema". Studi Geol. Camerti Vol. speciale 1990, 57-67.
- CALAMITA F., DEIANA G., IINVERNIZZI C. & PIZZI A. (1991) - *Tettonica*. In "L'ambiente fisico delle Marche", Regione Marche, Assessorato Urbanistico, Ed. S.EL.CA. (FI), 67-80.
- CALAMITA F., PIZZI A. & ROSCIONI M. (1992) - *I fasci di faglie recenti ed attive di M. Vettore - M.Bove e di M.Castello - M.Cardosa (Appennino umbro-marchigiano)*. Studi Geol. Camerti, Vol. speciale 1992, 81-95.
- CALAMITA F. & PIZZI A. (1994) - *Recent and active extensional tectonics in the southern Umbro-Marchean Apennines (Central Italy)*. Mem. Soc. Geol. It., **48**, 541-548.
- CELICO P. (1978) - *Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale*. Memorie e Note dell'Istituto di geologia Applicata, **14**, 3-97.
- CELICO F. & IANIRO A. (2002) - *La variazione del "Coefficiente di infiltrazione efficace Diretta" in funzione delle precipitazioni giornaliere: risultati sperimentali nella Piana di Isernia (Molise)*. Quaderni di Geologia Applicata, **1**, 49-58.
- CENTAMORE E., CHIOCCHINI M., DEIANA G., MICARELLI A. & PIERUCCINI U. (1971) - *Contributo alla conoscenza del Giurassico dell'Appennino umbro-marchigiano*. Studi Geol. Camerti, **1**, 7-90.
- CENTAMORE E., JACOBACCI A. & MARTELLI G. (1972) - *Modello strutturale umbro-marchigiano. Correlazione con le regioni adiacenti*. Boll. Serv. Geol. d'It., **93**, 155-188.
- CENTAMORE E., DEIANA G., MICARELLI A. & POTETTI M. (1986) - *Il Trias-Paleogene delle Marche*. Da "La Geologia delle Marche", Studi Geol. Camerti, numero speciale in occasione del 73° Congresso della Società Geologica Italiana, Roma 30 settembre-4 ottobre 1986, 9-27.
- CENTAMORE E. & MICARELLI A. (1991) - *Stratigrafia*. In "L'ambiente fisico delle Marche", Regione Marche, Assessorato Urbanistico, Ed. S.E.L.C.A. (FI), 1-66.
- CHIOCCHINI M., DEIANA G., MICARELLI A., MORETTI A. & PIERUCCINI U. (1976) - *Geologia dei Monti Sibillini nord-orientali*. Studi Geol. Camerti, **2**, 7-44.
- COLACICCHI R., PASSERI L. & PIALI G. (1970) - *Nuovi dati sul Giurese Umbro-Marchigiano ed ipotesi per un suo inquadramento regionale*. Mem. Soc. Geol. It., **9**, 839-874.
- COOPER J.C. & BURBI L. (1986) - *The geology of the central Sibillini Mountains*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 323-347.

- COSENTINO D. (1986) - *Alti strutturali mesozoici e loro implicazioni geodinamiche durante la tetto-genesi dell'Appennino centrale: un esempio nei M.ti Sibillini meridionali*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 349-356.
- DAMIANI A.V. (1975) - *Aspetti geomorfologici e possibile schema evolutivo dei Monti Sibillini (Appennino umbro-marchigiano)*. Boll. Serv. Geol. It., **46**, 231-314.
- DECANDIA F.A. (1982) - *Geologia dei Monti di Spoleto (provincia di Perugia)*. Boll. Soc. Geol. It., **101**, 291-315.
- DRAMIS F. & DEIANA G. (1972) - *Le sorgenti della provincia di Macerata*. Cam. Comm. Ind. Artig. e Agr. di Macerata, vol. **1-2**, Macerata.
- LAVECCHIA G. (1979) - *Analisi cinematica del sovrascorrimento del F. Fiastrone (Sibillini nord-orientali)*. Boll. Soc. Geol. It., **98**, 457-468.
- LAVECCHIA G. (1981) - *Appunti per uno schema strutturale dell'Appennino Umbro-Marchigiano. 3 - Lo stile deformativo*. Boll. Soc. Geol. d'It., **100**, 271-278.
- LAVECCHIA G. (1985) - *Il sovrascorrimento dei Monti Sibillini: analisi cinematica e strutturale*. Boll. Soc. Geol. It., **104**, 161-194.
- LAVECCHIA G., BARCHI M. & BROZZETTI F. (1994) - *Recent tectonics and active stress field in the Umbria - Marche Apennines*. Mem. Soc. Geol. It., **48**, 535-537.
- LAVECCHIA G. & PIALLI G. (1981) - *Appunti per uno schema strutturale dell'Appennino Umbro-Marchigiano. 1 - Il basamento*. Geologica Romana, **20**, 183-195.
- MARI G.M., CECILI A., CINNIRELLA A., LISI A., MARTARELLI L., SCALISE A.R., TACCHIA D., & VENTURA R. (2003) - *Proposta di modello dati GIS per la strutturazione dell'informazione idrogeologica a partire dalla Guida al rilevamento e alla rappresentazione della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000* (Quaderno SGN n°5, serie III, IPZS, Roma, 1995) - Poster, FIST Geoitalia 2003, 4° Forum Italiano Scienze della Terra, Bellaria, 16-18 settembre 2003.
- MARI G.M., CECILI A., LISI A., SCALISE A.R., TACCHIA D., & VENTURA R. (2004) - *GIS proposal for a structured hydrogeological information* - Poster, 32nd International Geological Congress, Firenze 2004.
- MASTORILLO L. (1996) - *Contributo alla valutazione delle risorse idriche sotterranee dell'Appennino carbonatico marchigiano*. Quaderni di geologia applicata, **3** (1), 25-35.
- NANNI T. (1991) - *Idrogeologia*. In "L'ambiente fisico delle Marche", Regione Marche, Assessorato Urbanistico, Ed. S.E.L.C.A. (FI), 115-209.
- PARISI G. (1994) - *Le successioni pelagiche del dominio umbro-marchigiano*. In: Guide Geologiche Regionali (Soc. Geol. It.), N. 7/1, Ed. BE-MA, 31-36.
- PASSERI L. (2001) - *Itinerario 22: Val di Tela*. In Guide Geologiche Regionali (Soc. Geol. It.) N°7/2, Ed. BE-MA, 152-159.
- PERRONE E. (1910) - *Reno, Lamone, Fiumi Uniti, Savio, Marecchia, Foglia, Metauro, Esino, Potenza, Chienti, Tenna, Aso ed altri minori. Pozzi artesiani della pianura emiliana, dal Panaro alla Marecchia e del litorale Adriatico, da Porto Corsini a Pesaro*. Min. Agr. Ind. e Comm., Mem. Illustrative della Carta idrografica d'It., **35**, Roma.
- PIALLI G. (1971) - *Facies di piana cotidale nel Calcare Massiccio dell'Appennino umbro-marchigiano*. Boll. Soc. Geol. It., **90**: 481-507.
- ROMA M. & VITALI V. (2008) - *Strumenti e metodologie informatiche per l'idrogeologia: dai dati alla rappresentazione cartografica*. In: L. Martarelli, A.R. Scalise (eds.) "Studi sperimentali finalizzati alla cartografia idrogeologica". Mem. Descr. della Carta Geol. d'It. **LXXXI**, 47-58.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1941) - *Foglio geologico 132 (Norcia)*. Carta geologica d'Italia, scala 1:100.000. IPZS, Roma.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1967) - *Foglio geologico 124 (Macerata)*. Carta geologica d'Italia, scala 1:100.000. IPZS, Roma.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1995) - *Carta Idrogeologica d'Italia 1:50.000*. Guida al rilevamento e alla rappresentazione. Quad. SGN n.5, serie III, IPZS, Roma.
- TARRAGONI C. (2001) - *Modello Concettuale e simulazione numerica delle condizioni di flusso degli acquiferi dell'alto bacino del Fiastrone (Sibillini nord-orientali)*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".
- TARRAGONI C. (2005) - *Definizione dell'assetto idrogeologico dei Monti Sibillini e sua verifica col contributo della simulazione numerica delle condizioni di flusso e dell'idrologia isotopica*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".